

油滴の蒸発特性に関する研究

—第2報 単一油滴の蒸発過程の実験的検討—

西 川 和 人*・末 次 秀 雄**

Study on the Evaporation Characteristics of a Fuel Droplet

(Part 2: Experimental Examination on the Vaporization
Process of a Fuel Droplet)

Kazuto NISHIKAWA, Hideo SUETSUGU

The evaporation processes of a single fuel droplet were studied experimentally as a part of the fundamental study of a diesel engine.

The experiment for the evaporation of single droplet was carried out with the condition of natural convection of circumferential.

The results of the experiment were in good agreement with the calculated values of evaporation characteristics (namely evaporation rate and life time of droplet etc.) shown in the first report (Part 1).

1. まえがき

ディーゼル機関の揮発性液体燃料の燃焼は噴霧の蒸発の現象に支配されている。

この噴霧の蒸発を扱うための基礎となるものが単一油滴の蒸発である。単一油滴の蒸発に関する実験的研究は Ranz-Marshall⁽¹⁾, EL-Wakil⁽²⁾, 小林⁽³⁾, 熊谷⁽⁴⁾, 角田・広安⁽⁵⁾らの報告がある。

筆者らは第1報⁽⁶⁾においてこの現象を理論的に解析した。

そこで、単一油滴の蒸発に関する理論的な解析の妥当性を検討するために、静止気体中においた石英糸の先端に $\phi 1.8$ [mm] の油滴を作り大気圧下で雰囲気温度を 100, 200, 300, 400, 500 [°C] に変化させ、純粋燃料である n-ヘプタンについての油滴の温度、直径、蒸発率、寿命時間などを中心に単一油滴の蒸発実験を行ったのでここに報告する。

2. 実験装置及び方法

第1図に実験装置の概略を示す。

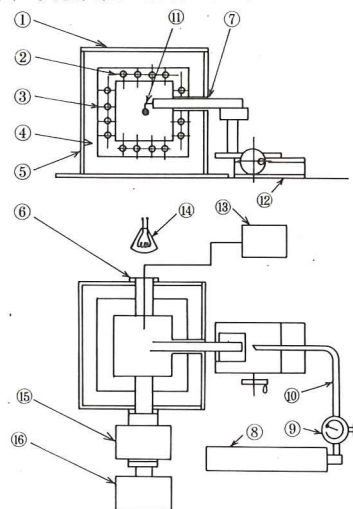


図1 実験装置

*機械工学科助手

**機械工学科助教授
1990年10月31日受付

高温室①は、室内温度を500°C以上にまで高めることが出来るヒータ②を取り付け、角熱板③を室内の保温のため断熱材④（ファイバーフラックスボード）で覆い、その周囲を鋼板⑤で補強している。室内の内容積は油滴を蒸発及び燃焼させるに必要な空気量が十分にある状態でなければならないことを考慮し一辺100 [mm] の立方体（1,000 [cc]）とした。また高温室内で蒸発する油滴の様子を容器外部から観察し撮影できるように石英ガラス⑥を対面2箇所に取り付け、油滴挿入用に直径24 [mm] の横穴⑦を開け、断熱材で蓋ができるように工夫した。

高温室内の雰囲気温度および油滴温度は急激に変化するために、高感度で自在に変形できる線径 $\phi 0.08$ [mm] の接地型C.A熱電対用素線（以下素線）を14箇所に使用した。

雰囲気温度計測用素線は炉内中央の3箇所に設置し、その平均温度を採用した。尚、電気抵抗による検出起電力の誤差をなくすために素線の長さを統一し、先端をミニトーチにより確実に溶着するようにした。

実験にあたってはまず、雰囲気気体の影響を解明するために、空気と窒素の2種類の気体で試験を実施した。空気は、大気中の空気をそのまま利用し、窒素は、150 [kg/cm²] の高圧窒素のボンベ⑧から、炉内空気を追い出すため減圧弁⑨により1.5 [kg/cm²] まで減圧し導いた。この減圧した窒素を油滴挿入穴（ $\phi 24$ mm）から銅パイプ⑩を挿入し10 [l/min] の流量で炉内に注入し、充満させ雰囲気を形成させた。

懸垂材の影響を解明するために、素線と石英糸⑪を用いて試験を行った。素線は $\phi 0.08$ [mm]、石英糸は $\phi 0.13$ [mm] を用い、いずれも先端を $\phi 0.7$ [mm] の球状にした。これらの懸垂材にマイクロシリンジ（5.0 μ l 用）で $\phi 1.8$ [mm] の油滴を懸垂した後、移動装置⑫を用い、油滴を瞬時に高温の気体に触れさせ蒸発させた。油滴温度 T_l は懸垂用熱電対素線を6ペン式温度計測記録計⑬に接続し、連続して計測した。

蒸発中の油滴直径及び蒸発過程は、シネライト⑭により直接、油滴を照らし、それによって出来る油滴の影を8mmシネカメラ⑮と8mmビデオ⑯により撮影し、モニターに映し出された画像（約50倍）の油滴の大きさをデジマチックキャリッパにて読み取り記録した。

石英糸および素線の先端で蒸発している油滴は重量により細長くなり、完全な球ではないので、これを回転楕円体としそれと等しい表面積を有する球を考え、楕円の長径 l_1 と短径 l_2 を測定し、次式によって等価

油滴直径を求めた。

$$D = l_2 \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 + \frac{(l_1/l_2)^2}{\sqrt{(l_1/l_2)^2 - 1}} \sin^{-1} \frac{\sqrt{(l_1/l_2)^2 - 1}}{(l_1/l_2)} \right)}$$

…(1)

以上の装置、方法によって、雰囲気温度を100, 200, 300, 400, 500 [°C] に変化させ、純粋燃料であるn-ヘプタンについての単一油滴の蒸発実験を行った。

3. 実験結果

図2は蒸発過程の油滴を8mmビデオで撮影し、その後モニターに映し出された画像を35mmカメラにて撮影した油滴蒸発過程の一連の連続写真を示す。n-ヘプタン、大気圧、雰囲気気体窒素、雰囲気温度100 [°C] で懸垂材に素線と石英糸を用いた場合の例である。

いずれの場合も、時間経過とともに油滴直径 $2 \times D_l^2$ が減少していく様子を観察することができる。

また、素線の場合の蒸発過程で3コマ目より油滴自身が $\phi 0.7$ [mm] の球状の上部に移動を開始し5コマ目ではほぼ中間位置、6コマ目で完全に持ち上がり、7コマ目では油滴の大きさがより減少し、8コマ目で蒸発が終了したことが鮮明に確認できる。この現象を持ち上げ現象と称することにした。

この持ち上げ現象の発生理由は油滴の蒸発経過に伴い、油滴質量が減少し、表面張力が優った結果に、さらに懸垂材の一部の表面に液体表面を新たに生成する付着作用の相乗効果の結果と考えられる。また、この現象は油滴温度変化にも顕著に表れている。

3. 1 油滴温度

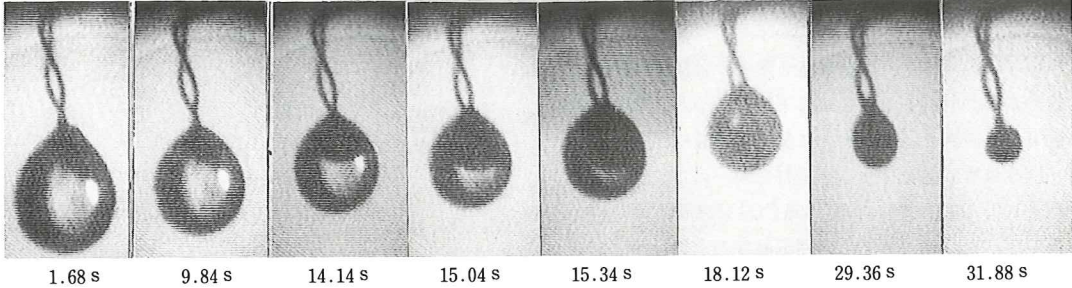
油滴温度の計測は懸垂材として使用した熱電対の素線により測定し、6ペン式温度記録計に描かせて求めた油滴の温度変化を図3、4に示す。

図3は雰囲気気体窒素において雰囲気温度100, 200, 300, 400, 500 [°C] に変化させた場合の油滴温度 T_l の変化を示したものである。

図4は雰囲気温度を一定（500 [°C]）としたときの雰囲気気体の違いにおける油滴の温度 T_l 変化を示す。

いずれの場合も加熱開始直後の油滴温度は、急激に上昇するが暫くすると、その上昇率は鈍り、やがて緩やかな平衡状態が続く。その後、持ち上げ現象の影響により瞬時に下降し、緩やかな横ばい状態になり、油滴の蒸発が終了する付近で素線の感熱部が高温の気体に触れ、再び急激な上昇を示す。

雰囲気気体 窒素
 雰囲気温度 100 [°C]
 懸垂材 素線



懸垂材 石英

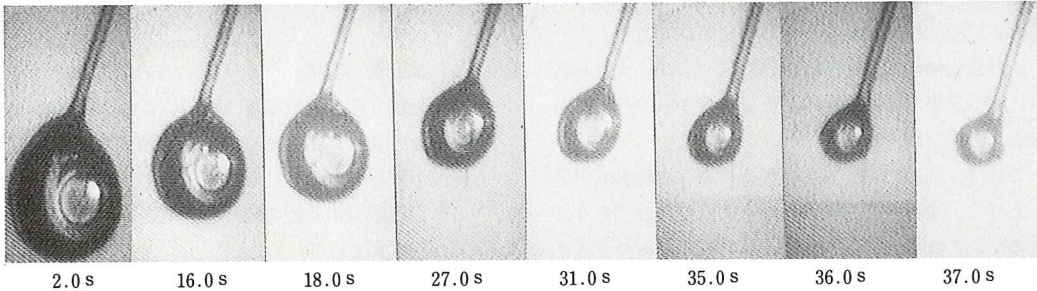


図2 油滴蒸発過程の連続写真

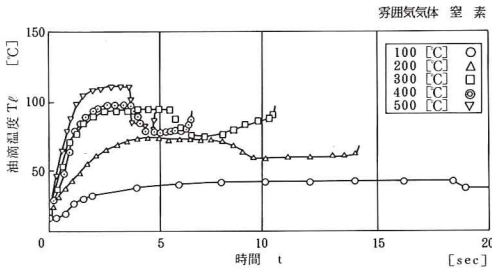


図3 油滴の温度変化

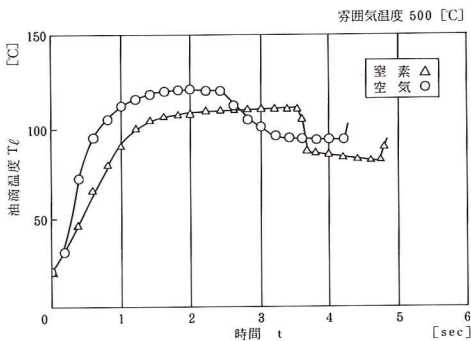


図4 油滴の温度変化

また、図3においては雰囲気温度が高温になるにしたがい油滴最高温度及び真の油滴温度（持ち上げ現象時の温度）は高く、加熱開始直後の温度上昇率も大きくなる。なお、真の油滴温度の現出時間は、雰囲気温度100 [°C] のときは、約18.0秒、200 [°C] のときは約9.0秒、300 [°C] のときは約6.5秒、400 [°C] のときは約4.2秒、500 [°C] のときは約3.7秒であり、雰囲気温度が高温になるにしたがい早くなる。

さらに、図4の例と同じく、どの雰囲気温度においても、雰囲気気体窒素に比べ空気の方が加熱開始直後の温度上昇率は大きく、油滴最高温度も高い。

これは空気が窒素よりも、また素線が石英系より熱伝導率が高く⁽¹⁰⁾、雰囲気温度の影響をより大きく受け、加熱開始直後の油滴の温度を上昇させたと考えられる。

ここで、持ち上げ現象の影響で油滴温度が瞬時に下降するのは、雰囲気温度の影響を受ける気液界面（油滴表面と境界層との境界面）付近の油滴温度を検出していた素線の感熱部が、持ち上げ現象により油滴のほぼ中央に位置し、雰囲気温度の影響を受けず、油滴の真の温度を検出するようになったためと考えられる。

3. 2 蒸発曲線

前述のようにして求めた油滴直径から油滴直径の2乗 $D\ell^2$ (表面積相当) の時間変化を蒸発曲線と称し、図5, 6に示す。

いずれの場合も、油滴直径2乗 $D\ell^2$ は蒸発開始直後、緩やかな凸曲線を描きながら下降し、やがて準定常状態となり時間と共に直線的に減少し消滅に至る。

図5は雰囲気気体及び懸垂材を同一にし、雰囲気温度を100, 200, 300, 400, 500 [°C] に変化させた例であるが、これによると、雰囲気温度の上昇と共に蒸発速度は大きくなり、油滴の寿命時間は急速に短くなっている。

図6は雰囲気温度を300 [°C] に一定とし、雰囲気気体および懸垂材を変えたときの蒸発曲線である。

その変化傾向は、雰囲気気体空気の方が、また石英糸に比べ素線の方が蒸発開始直後に大きめの凸曲線を描き、蒸発時間も短い。

これは、前述の熱伝導率の影響により油滴温度が早く上昇し、油滴直径2乗 $D\ell^2$ が増大したものであり、このためこれらの寿命時間は、より短くなったと考えられる。

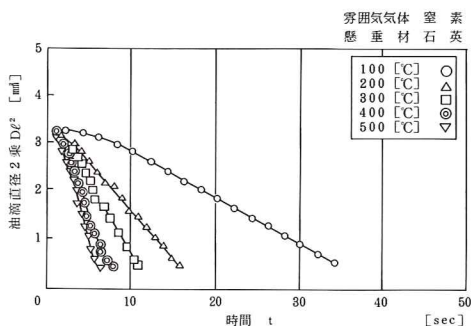


図5 蒸発曲線 (雰囲気温度の影響)

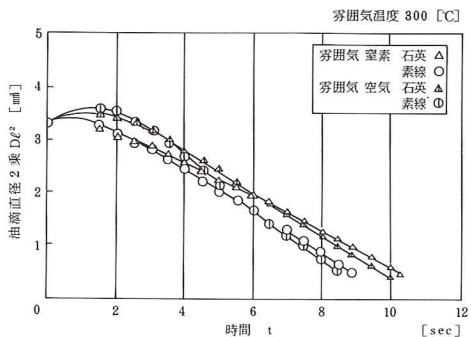


図6 蒸発曲線 (雰囲気気体及び懸垂材の影響)

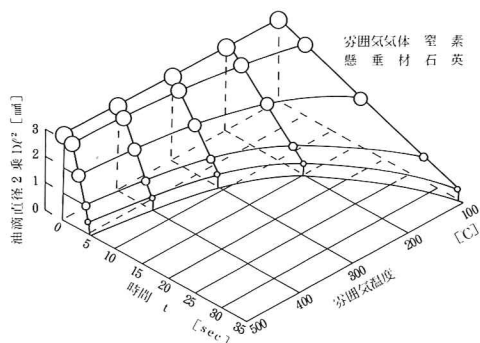


図7 蒸発曲線 (雰囲気温度の影響)

図7は、図5を3次元化したものである。

3. 3 蒸発率

前節の図5の雰囲気温度の違いによる蒸発曲線の例で判るように定常蒸発過程における油滴直径2乗 $D\ell^2$ と時間の関係が直線的になっていることが認められる。

この直線部分の勾配の絶対値を蒸発率 (K) といい、次式から求めた。

$$K = \frac{dD\ell^2}{dt} \dots\dots\dots(2)$$

その例を図8に示す。

図8は、雰囲気気体を窒素とした場合の懸垂材の違いによる蒸発率を示す。

いずれの場合も蒸発率は、雰囲気温度が高温になるにしたがい、その値は高くなる。また、懸垂材、雰囲気気体の違いは蒸発曲線、油滴温度の場合と同じ傾向を示している。

3. 4 油滴寿命

油滴が蒸発を開始してから消滅するまでの時間、すなわち油滴の寿命時間が重要な値であるのでこれにつ

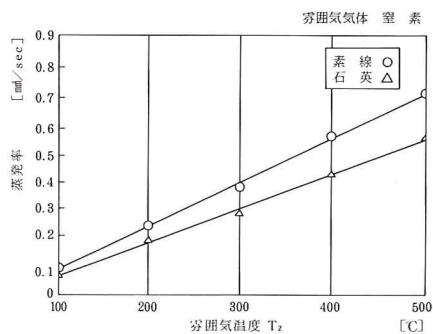


図8 蒸発率 (懸垂材の影響)

いて測定を行った。

図5, 6のような蒸発曲線を各実験条件について描き, それらの曲線から油滴の寿命時間を決定するが, 油滴が高温室に入った瞬間から油滴直径2乗 D_t^2 が懸垂材の先端の大きさ $0.5 [\text{mm}^2]$ と等しくなるまでの時間を油滴寿命とした。その例を図9に示す。

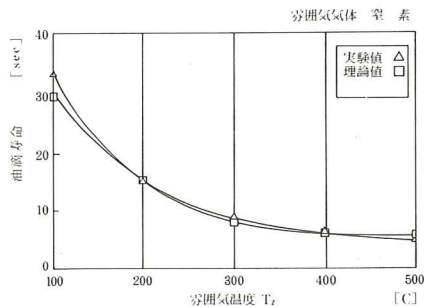


図9 油滴寿命の実験値と理論値との比較

雰囲気温度が上昇すると油滴の寿命時間は短くなっている, また雰囲気温度が300°C以下の場合, 極端に寿命は長い, これ以上であると寿命時間はほぼ同一であることから低温雰囲気であれば雰囲気温度に, より大きな影響を受けることが判る。

なお実験値と理論値とはほぼ同一の値となっている。

4. 理論との比較

前章までの実験結果と第一報の理論値および角田氏等との実験値とを比較してみる。

図10は油滴温度の例を示す。加熱開始直後の温度上昇率及び油滴最高温度は, 本実験結果と理論値及び角田氏等の実験値との間に差があるが, これは初期油滴温度および素線と石英糸との差によるものである。平衡状態の油滴温度は持ち上げ現象による真の油滴温度とほぼ同一の値を示している。これにより真の油滴温度を蒸発過程の油滴温度に採用しても良いことが判明した。

図11は蒸発曲線の例を示す。いずれも蒸発変化割合および蒸発時間はほぼ同一の値であるが蒸発開始直後の油滴直径2乗 D_t^2 の角田氏等の実験値との間の差は初期油滴温度の差であり, 蒸発終了の時間の差は持ち上げ現象の影響により変化率が緩くなった結果, 生じた差異と考えられる。

図12は蒸発率の例を示す。理論値とは微小な差を示

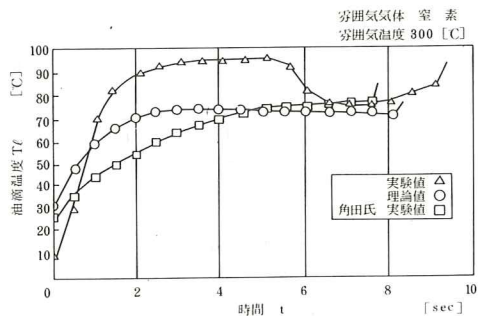


図10 油滴温度の実験値と理論値との比較

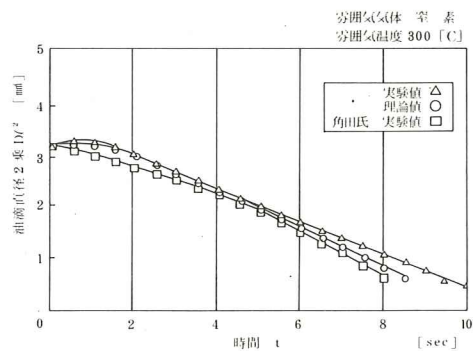


図11 蒸発曲線の実験値と理論値との比較

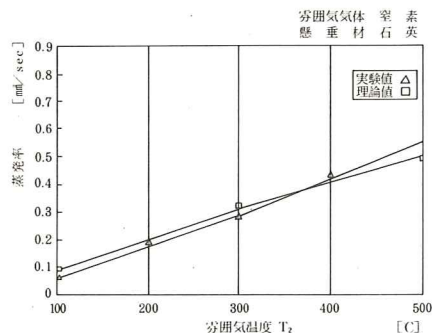


図12 蒸発率の実験値と理論値との比較

しているもののほぼ同一の値と考えられる。

5. 結 論

第一報では単一油滴の蒸発特性に関する理論的解析を行ったが, 本研究では蒸発試験装置を設計, 製作し, 高温炉特性試験を行い, さらに, 蒸発特性に関する実験的研究を行った。

本試験では, 大気圧下で雰囲気温度を100, 200, 300, 400, 500 [°C] に変化させ, 雰囲気気体や懸垂材の違

いによる油滴寿命, 油滴温度 T_d , 油滴直径 2 乗 D_d^2 及び蒸発率の変化の影響を明らかにし以下の結論を得た。

1) 油滴温度は, 雰囲気温度が高温になるにつれ高くなり, 持ち上げ現象により独特な変化を示すが, その傾向は雰囲気気体及び雰囲気温度の違いに関わらず同じである。

尚, 雰囲気温度は油滴の臨界温度をかなり越えた状態になったが, 油滴自身の温度は臨界温度に達しておらず燃焼状態には至らなかったことが判明した。

2) 雰囲気温度が高温になるにつれ油滴温度は高く, 油滴寿命は短くなる。また, 油滴直径 2 乗 D_d^2 の変化割合及び蒸発率は, 雰囲気温度が高温になるにつれ大きくなる。

3) 雰囲気気体窒素に比べ空気の方が, 油滴温度 T_d は高く, 油滴寿命は短くなる。また, 油滴直径 2 乗 D_d^2 の変化割合及び蒸発率については, 窒素よりも空気の方がその値は大きくなる。

4) 懸垂材石英糸に比べ素線の方が, 油滴寿命は短くなり, 油滴直径 2 乗 D_d^2 の変化割合及び蒸発率においては大きくなる。

これは空気が窒素よりも, また素線が石英糸より熱伝導率が⁽¹⁰⁾高く, 雰囲気温度の影響をより大きく受け, 油滴内部へ伝えるからだと考えられる。

5) 本実験を通じ, 油滴の蒸発過程において油滴が持ち上げられる現象が起こることが明らかになった。この持ち上げ現象の発生理由は油滴の蒸発経過に伴い, 油滴質量が減少し, 表面張力が優れた結果に, さらに懸垂材の一部の表面に液体表面を新たに生成する付着作用の相乗効果に起因するものと考えられる。

また, 持ち上げ現象の影響で油滴温度が瞬時に下降するのは, 雰囲気温度の影響を受ける気液界面(油滴表面と境界層との境界面) 付近の油滴温度を検出していた素線の感熱部が, 持ち上げ現象により油滴のほぼ中央に位置し, 雰囲気温度の影響を受けず, 油滴の真の温度を検出するようになったためと考えられる。

本研究結果が第一報の理論式による計算結果と比較し, ほぼ同一の曲線を描くことから単一油滴の蒸発特性が明らかになった。また, これらの値が角田氏による実験結果とも近似していることから本研究の妥当性が立証された。

終わりに, 本研究の遂行に当たり種々の御教示, 助言を頂きました本学機械工学科流体研の恒屋礼二郎教授に深く感謝の意を表します。また, 本研究の一部は平成元年度本学機械工学科の卒業研究として実施されたもので, 当時 4 年生の成安 勉, 古沢 明, 宮川智好の諸氏に謝意を表します。尚, 本研究は平成元年度本学奨励教育研究費の一部を使用して行ったものである。

参考文献

- (1) Ranz, W. E. and Marshall, W. M., Chem. Engng. -Progr., 48-4 (1952), 173
- (2) EL-Wakil, M. M., ほか 4 名, NACA Tech. Note, No. 3490 (1956)
- (3) 小林, 日本機械学会論文集
20巻100号 (昭29), 826.
- (4) 熊谷, 燃焼 (1980)
岩波書店
- (5) 広安・他 3 名, 日本機械学会論文集
40巻339号 (昭49-11)
- (6) 西川・末次, 長崎総合科学大学紀要
第30巻第1号 (1989)
- (7) 佐藤, 物性定数推算法 (昭52)
丸善株式会社
- (8) 日本機械学会, 流体の熱物性値集 (昭61)
社団法人日本機械学会
- (9) 化学工学協会編, 化学工学便覧 (昭51)
丸善株式会社
- (10) 日本機械学会, 伝熱工学資料 (昭61)
社団法人日本機械学会